

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт Инженерной Физики и Радиоэлектроники
Базовая кафедра Фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А. Н. Втюрин
подпись
« ____ » _____ 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование влияния шумов ВОЛС используемой в составе БИС ГЛОНАСС
16.04.01 Техническая физика
16.04.01.02 Оптическая физика и квантовая электроника

Научный руководитель _____ доцент, к.ф.-м.н. М.Ю. Реушев
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник _____ А.А. Тодоякова
подпись, дата инициалы, фамилия

Нормоконтролер _____ А.В. Шамшурин
подпись, дата инициалы, фамилия

Красноярск 2017

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Исследование влияния шумов ВОЛС используемой в составе БИС ГЛОНАСС» содержит 49 страниц текстового документа, 14 использованных источников, 20 рисунков и 7 таблиц.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ, КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ, КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА, ДИСПЕРТИЯ АЛЛАНА, ВОДОРОДНЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТ И СИГНАЛОВ.

Диссертация посвящена разработке и исследованию оптоволоконного конвертора аналоговых радиочастотных сигналов в диапазоне частот от 10 МГц до 2.5 ГГц.

Основным результатом работы является то, что был создан макет ВОЛС, который в случае доработки может быть доведен для серийного образца, пригодного для применения, в том числе, в составе систем беззапросных измерительных системах ГЛОНАСС.

Исследования показали, что макет ВОЛС ухудшает стабильность прохождения опорного сигнала 100 МГц, что связано с высоким значением шума ($NF \approx 30$ дБ) приемно-передающих устройств.

По результатам исследований был сделан вывод о том, что для передачи сигналов опорных частот для БИС наземного сегмента ГЛОНАСС целесообразно использовать передающие волоконно-оптические устройства с внешней модуляцией излучения, например на основе эффекта Поккельса в кристаллах, так как они не содержат резистивных (основных) источников шума на входе ВОЛС, в случае применения волоконно-оптических передатчиков с прямой модуляцией излучения.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Литературный обзор	8
1.1 Навигационная система ГЛОНАСС	8
1.2 Сравнительный анализ свойств радиочастотных и волоконно- оптических кабелей.....	9
1.3 Принципы организации и основные параметры ВОЛС для передачи аналоговых радиочастотных сигналов	11
1.4 Шумы ВОЛС с прямой модуляцией лазерного излучения.....	19
1.5 Особенности передачи стабильных сигналов частоты и времени в аналоговой ВОЛС	22
2 Разработка и исследование аналоговой ВОЛС с прямой модуляцией РЧ сигнала для передачи сигналов опорной частоты 100 МГц	24
2.1 Цели и решаемые задачи	24
2.2 Результаты экспериментальных исследований	24
2.2.1 Состав ВОЛС	24
2.2.2 Перечень испытаний, выполненных на экспериментальной установке ВОЛС.....	25
2.2.3 Оборудование, приборы, использованные при испытаниях	26
2.2.4 Параметры макетов ВОЛС.....	26
2.2.4.1 Состав макета ВОЛС ([изъято наименование предприятия])	26
2.2.4.2 Состав макета ВОЛС (Optical Zone, USA)	28
2.3 Предварительная настройка модуля ПРД ([изъято наименование предприятия])	29
2.4 Определение коэффициента шума ВОЛС	31
2.5 Исследование зависимости влияния рабочей температуры ВОЛС на коэффициенты передачи	34
2.6 Результаты сравнения испытаний макетов ВОЛС	39
2.7 Исследование стабильности передачи сигнала опорной частоты 100	

МГц от водородного стандарта частоты Ч1-1006	40
2.8 Основные выводы экспериментальных исследований	43
Заключение	45
Список сокращений	46
Список использованных источников	47

ВВЕДЕНИЕ

Развитие мировых глобальных навигационных спутниковых систем идет по пути повышения точности, доступности позиционирования и обеспечения целостности навигационного поля. Реализуемые и разрабатываемые проекты модернизации ГЛОНАСС в основном сконцентрированы на повышении стабильности бортовых и наземных стандартов частот, совершенствовании наземной системы траекторных измерений, синхронизации бортовых стандартов частоты по наземному эталону, уточнении модели движения космических аппаратов по орбите и ряда других [1, 2].

Важной составляющей наземного сегмента системы является независимость качества сигнала стандартов частоты от внешних факторов, определяющих нестабильность работы (колебания температуры, механические нагрузки, внешние электромагнитные помехи и др.). При всей совершенности навигационной аппаратуры фазовые шумы являются основной причиной, влияющей на точность навигационного поля. Причины возникновения шумов могут быть самые различные, включая собственные шумы стандартов частоты и времени, шумы приемо-передающих антенн и линий связи между антеннами и стандартами частоты.

Обычно, в качестве линий связи между приемо-передающей антенной и приборами входящим в состав стандарта частоты и времени используется радиочастотный коаксиальный кабель. Но уже в конце 90-х годах прошлого столетия инженеры из NASA для увеличения помехоустойчивости кластера на станции слежения Goldstone Tracking Station провели испытания по замене радиочастотного кабеля на оптоволокно. Результаты испытаний позволили сделать выводы о перспективности такой замены.

Передача по оптоволоконным кабелям сигнальной информации в системах наземного сегмента ГЛОНАСС предъявляет высокие требования не только к оптическому волокну, но и к приемо-передающим системам, преобразующим радиочастотный сигнал в оптическое излучение и обратно.

Такие системы должны обладать широкой полосой модуляции (до 6 ГГц) со стороны передатчика и такой же широкой полосой демодуляции с приемной стороны. В настоящее время подобное оборудование не выпускается серийно в связи с его специфическим применением и в основном для военных целей.

Анализ существующих технических решений на рынке производителей оптоэлектронной продукции в России и за рубежом, позволяет сделать вывод о том, что применение оптоволоконных приемопередатчиков с широкой полосой модуляции оптического сигнала и одномодовых оптоволоконных кабелей, позволит повысить помехоустойчивость беззапросной измерительной системы наземного сегмента ГЛОНАСС и GPS путем передачи опорных частот (100 МГц) и синхросигналов (1 Гц) от внешнего стандарта частоты и времени на расстоянии более 50 м по волоконно-оптическому кабелю не ухудшая их характеристик по сравнению с передачей по радиочастотному кабелю.

В данной работе исследовалась аналоговая волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) для беззапросных измерительных систем (БИС) ГЛОНАСС.

Основной целью работы является разработка и исследование модели ВОЛС для передачи опорной частоты 100 МГц от водородного стандарта частоты и времени Ч1–1006.

В работе приведены результаты исследований коэффициентов передачи и шума ВОЛС двух модификаций. В первой модификации ВОЛС использовалась приемо-передающая аппаратура OZ450 (Optical Zonu, USA). Во второй модификации исследовалась аппаратура, разрабатываемая в рамках сотрудничества между [изъято наименование предприятия] и кафедры ФИЛТ ИИФиРЭ СФУ на базе волоконных лазерных диодов и фотоприемных диодов фирмы ООО «Лазерском» (Минск, Беларусь). Результаты исследований показали преимущество собственной разработки ВОЛС по сравнению с OZ450. Для данной конструкции были проведены исследования стабильности передачи сигнала опорной частоты 100 МГц от водородного стандарта частоты Ч1-1006 путем измерения значений дисперсии Аллана.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки моделей аналоговых ВОЛС, используемых в БИС ГЛОНАСС.

1 Литературный обзор

1.1 Навигационная система ГЛОНАСС

Глобальная Навигационная Спутниковая Система была разработана в начале 80-х годов специалистами Советских Аэрокосмических Сил.

Система ГЛОНАСС включает в себя космический комплекс системы, состоящий из орбитальной группировки, наземного комплекса управления и навигационной аппаратуры потребителей гражданского и специального применения.

Штатная группировка ГЛОНАСС включает в себя 24 спутника, находящихся на средневисотных околокруговых орбитах с номинальными значениями высоты – 19100 км, наклонения – $64,8^\circ$ и периода – 11 часов 15 минут 44 секунды. Значение периода позволило создать устойчивую орбитальную систему, не требующую, в отличие от GPS, для своего поддержания корректирующих импульсов практически в течение всего своего активного существования. Номинальное наклонение обеспечивает стопроцентную доступность навигации на территории Российской Федерации даже при условии выхода из орбитальной группировки нескольких космических аппаратов.

На этапе проектирования для системы ГЛОНАСС был принят частотный метод разделения сигналов различных космических аппаратов. Каждый из них использует свою пару несущих частот, одна из которых принадлежит диапазону L1 стандартной точности (1600,995 МГц), другая – диапазону высокой точности L2 (1248,06 МГц).

Современная спутниковая навигация основывается на использовании принципа беззапросных дальномерных измерений между навигационными спутниками и потребителем. Передаваемые каждым космическим аппаратом системы ГЛОНАСС в составе оперативной информации эфемериды описывают положение фазового центра передающей антенны данного космического

аппарата в связанной с Землей геоцентрической системе координат ПЗ-90. В качестве шкалы времени ГЛОНАСС принята условная непрерывная шкала времени, формируемая на основе шкалы времени Центрального синхронизатора системы, оснащенного водородными стандартами частоты. Опорной шкалой времени для системы ГЛОНАСС является национальная координированная шкала времени России UTC (SU), расхождение с которой не должно превышать 1 мс [3, 4].

1.2 Сравнительный анализ свойств радиочастотных и волоконно-оптических кабелей

Основными элементами, входящими в состав станции наземного сегмента, являются антенный модуль, малошумящий усилитель (МШУ) сигнала с антенного модуля, радиочастотный кабель и приемник навигационных сигналов.

Радиочастотный коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом получил широкое применение в различных системах радиосвязи и высокочастотных передающих устройствах.

Альтернативной радиочастотному коаксиальному кабелю является волоконно-оптический кабель. Существует два типа оптических волокон: многомодовые и одномодовые, отличающиеся диаметрами световедущей сердцевины. Многомодовые волокна бывают со ступенчатым и градиентным профилям показателем преломления по его сечению.

В ступенчатом оптоволокне могут возбуждаться и распространяться до тысячи мод с различным распределением по сечению и длине оптоволокна. При прохождении по оптоволокну моды имеют различные оптические пути и время распространения, что приводит к уширению импульса света. Это явление называется межмодовой дисперсией и оно непосредственно влияет на скорость передачи информации по оптоволокну.

Многомодовое оптическое волокно с градиентным показателем преломления отличается от ступенчатого тем, что показатель преломления изменяется в нём плавно от середины к краю, в результате чего межмодовая дисперсия уменьшается.

В одномодовом оптоволокне существует и распространяется только одна мода (точнее две вырожденные моды с ортогональными поляризациями), поэтому в нем отсутствует межмодовая дисперсия.

Обобщенные сравнительные характеристики оптических волокон приведены в таблице 1

Таблица 1 – Сравнение одномодовых и многомодовых волокон

Параметры	Многомодовые	Одномодовые
Используемые длины волн, мкм	0,85, реже 1,3	1,3 и 1,5
Затухание дБ/км	1,0 – 3,0	0,4 – 0,5
Тип передатчика	светодиод	лазер, реже светодиод
Толщина сердечника, мкм	50 или 62,5	8
Дальность передачи, км	до 2 км	около 20 км
Возможная скорость передачи, Гб	до 1 на огран. длине	10 и более

В таблице 2 приведены сравнительные характеристики коаксиального и волоконно-оптического одномодового кабеля.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики коаксиального и волоконно-оптического кабеля

Тип кабеля/характеристики	Коаксиальный	Оптоволоконный
Скорость передачи данных, Гбит/с (макс)	1	40
Расстояния между ретрансляторами, км	до 30	до 100
Вес, кг/км	от 200 до 1000	от 50 до 66
Затухание, дБ/км (макс)	76 (RG-11/U)	1.0/0.75
Использование в огнеопасных газовых средах	Опасно	Безопасно
Заземление	Необходимо	Не требуется
Влияние повышения температуры на затухание	Затухание возрастает	Не влияет
Подверженность внешним помехам	Подвержены	Не подвержены
Влияние коррозии	Подвержены	Не подвержены

Преимущество волоконно-оптических кабелей заключается в невосприимчивости к электрическим помехам и наводкам, а также небольших размерах и минимальном весе. Отсутствие электропроводности для

оптоволоконного кабеля исключает проблемы, связанные с изменениями потенциала земли, устраняет опасность повреждения оборудования, вызванного бросками тока от молний и т. п.

Широкая полоса передачи оптического волокна позволяет одновременно передавать по одному волоконно-оптическому кабелю высококачественное видео, звук и цифровые данные. Низкие потери, волоконно-оптические кабели позволяют передавать сигналы изображения на большие расстояния без использования маршрутных усилителей или репитеров.

Заменой радиочастотных коаксиальных кабелей на волоконно-оптические можно уменьшить потери между приемной антенной и контрольной станцией, и как следствие, получить более чистый сигнал [5 – 7].

1.3 Принципы организации и основные параметры ВОЛС для передачи аналоговых радиочастотных сигналов

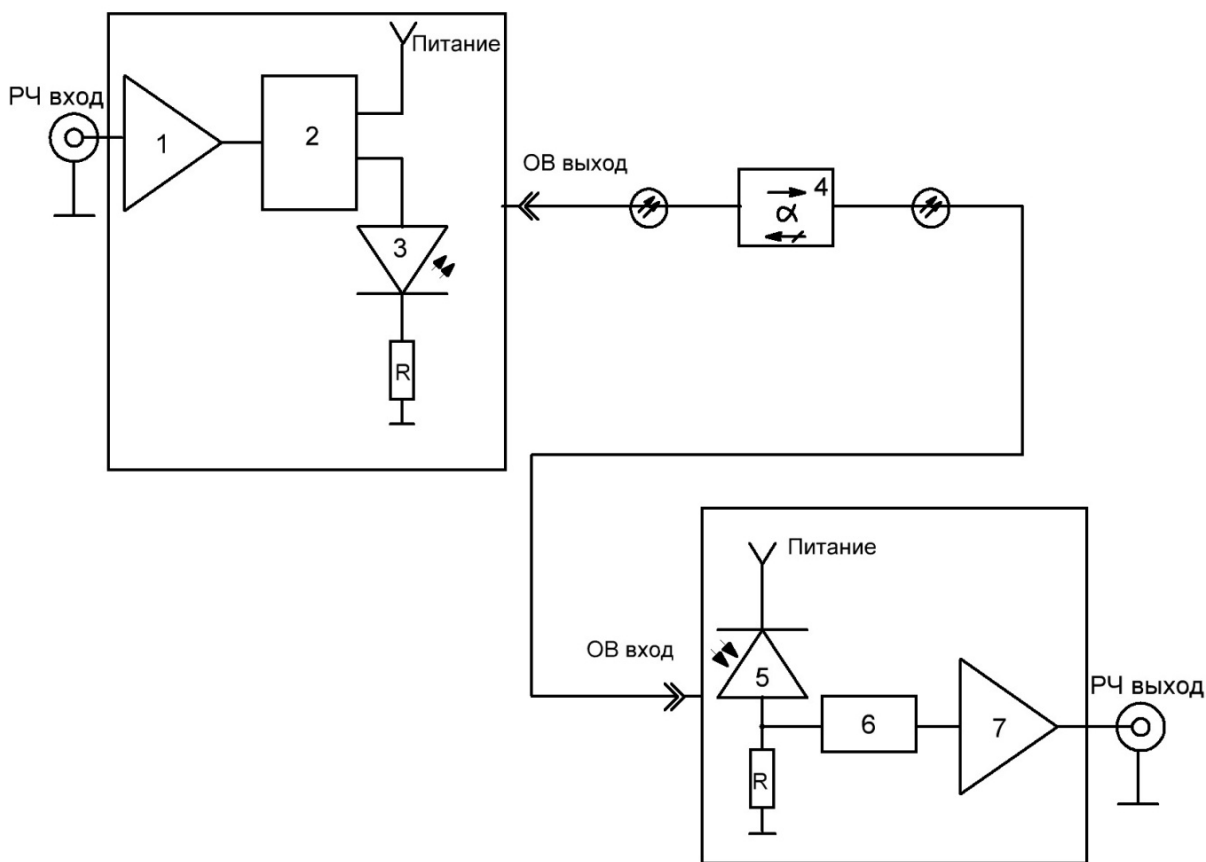
Волоконно-оптические линии связи получили широкое распространение в различных областях науки и техники. В большинстве случаев, ВОЛС используется для передачи информации цифровых систем. Однако не остаются без внимания и простейшие аналоговые системы с прямой РЧ модуляцией интенсивности излучения на входе передающего модуля ВОЛС, путем модуляции тока накачки инжекционного полупроводникового лазера, транспортировкой сигнала амплитудной модуляции несущей электромагнитной волны по оптоволокну и прямым детектированием фототока на выходе из волокна. Пример служат локальные ВОЛС специального назначения, позиционно разнесенные системы радиолокации и навигации, антенные системы, удаленные от пунктов управления и обработки информации и другие. Решение использовать аналоговые ВОЛС в таких системах часто оказывается единственно правильным, надежным и экономически выгодным.

Функциональная схема аналоговой волоконно-оптической линии связи устроена следующим образом.

Входной РЧ сигнал подается на вход модуля передатчика, который обеспечивает согласование импедансов между 50 Ом и волновым сопротивлением входа и блоками управления тока смещения лазера, термостабилизации, мониторинга мощности лазера и сигнализации.

Модуль передатчика преобразует РЧ сигнал в модулированное излучение лазера. Излучение лазера проходит через волоконно-оптический кабель и поступает на фотодиодный модуль оптического приемника. Фотодиодный модуль оптического приемника конвертирует модулированное излучение лазера обратно в РЧ сигнал. После конвертации РЧ сигнал поступает на вход РЧ усилителя, который является одновременно и устройством согласования импедансов фотодиодного модуля (обычно это источник тока с сопротивлением порядка 100 Ом-2 кОм) с его выходом (как правило – 50 Ом).

Типовая схема волоконно-оптической линии связи показана на рисунке 1.



- 1 – малошумящий усилитель; 2 – согласующее устройство; 3 – лазерный диод;
 4 – оптический изолятор; 5 – фотодиод; 6 – согласующее устройство;
 7 – малошумящий усилитель

Рисунок 1 – Пример функциональной схемы волоконно-оптической линии связи

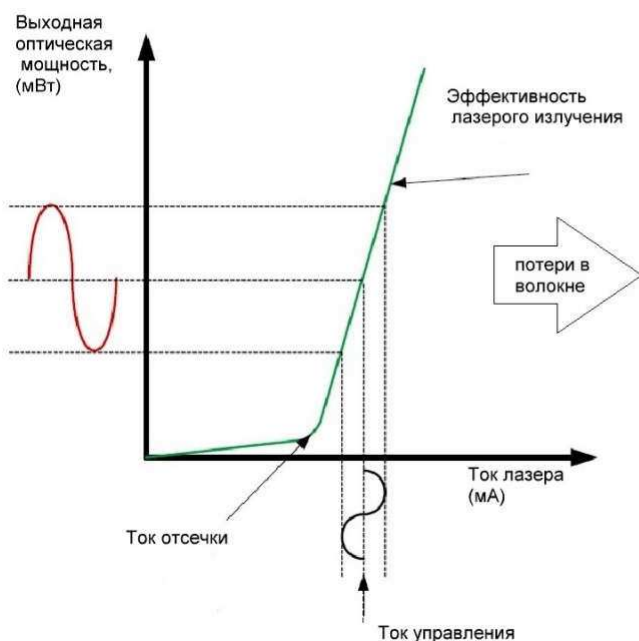
При передаче аналоговых сигналов через РЧ усилитель к нему предъявляются множество дополнительных требований по сравнению с импульсными приемо-передающими устройствами и главное требование – широкая полоса пропускания устройства. При этом требование к широкой полосе пропускания усилителя должно сопровождаться требованием широкого динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих (англ. – *SFDR*), низкого уровня плотности шума (шум-фактор) (англ. – *NF*), низкого уровня интермодуляционных искажений (англ. – *ИПЗ*).

В настоящее время существуют тенденция к разработке волоконно-оптических приемопередающих устройств, преимущественно двух типов.

Первый тип – без малошумящих усилителей (МШУ) (англ. – Low Noise Amplifiers (LNA)) и второй тип – с встроенным в передающий модуль МШУ. Типичный приемник ВОПП без МШУ имеет коэффициент передачи порядка 1 ± 1 дБ, с МШУ имеет коэффициент передачи порядка 20 ± 1 дБ и более.

Эффективность передачи РЧ сигналов через ВОПП зависит от многих причин. На рисунке 2 представлены схемы, поясняющие основные фотоэлектрические процессы на лазерном излучающем диоде и фотоприемном диоде, основными устройствами волоконно-оптической линии связи.

Типовая характеристика лазерного диода



Типовая характеристика фотодиода

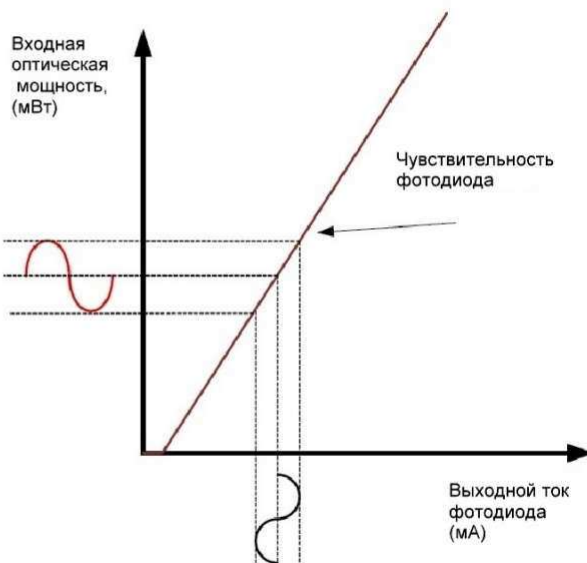


Рисунок 2 – Фотоэлектрические процессы на лазерном диоде (англ. – Laser Diode) и фотодиоде (англ. – Photo Diode)

Суммарная эффективность сквозного волоконно-оптического приемопередающего тракта определяется следующими параметрами:

- общий коэффициент передачи оптоволоконного конвертера (ОВК) $K_{ОВК}$ (дБ) по РЧ сигналу;
- коэффициент усиления МШУ по РЧ сигналу на входе ОВК $K_{МШУ}$ (дБ);
- коэффициент преобразования РЧ сигнала в оптический сигнал $K_{ПРД}$ (дБ);
- коэффициент преобразования оптического сигнала в РЧ сигнал $K_{ПРМ}$ (дБ);
- оптические потери $A_{ОПТ}$ (дБ).

Для оценки коэффициента передачи сквозного волоконно-оптического тракта, можно воспользоваться следующим выражением:

$$K_{ОВК} (\text{дБ}) = K_{МШУ} (\text{дБ}) + 20 \lg(K_{ПРД} \times K_{ПРМ}) - 2A_{ОПТ} (\text{дБ}) \quad (1)$$

Одна из причин снижения эффективности передачи РЧ сигнала связана с оптическими потерями в приемном модуле. Как показывает практика,

оптические потери в 1 дБ, сопровождаются 2 дБ потерь мощности РЧ сигнала. Это подтверждается простыми теоретическими выкладками относительно процессов конвертирования модулированной оптической мощности на фотоприемном диоде.

При облучении лазерным излучением фотодиод генерирует ток, который может быть оценен согласно следующему выражению:

$$I_{\text{ФД}} = r_{\text{ФД}} \times P_{\text{ОПТ}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{ФД}}$ – ток фотодиода (А);

$r_{\text{ФД}}$ – чувствительность фотодиода (А/Вт);

$P_{\text{ОПТ}}$ – оптическая мощность, падающая на фотодиод (Вт).

Оценку выходной РЧ мощности можно выполнить, используя следующее выражение:

$$P_{\text{РЧ}} = I_{\text{ФД}}^2 \times R_{\text{ФД}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{РЧ}}$ – РЧ мощность с фотодиода (Вт);

$R_{\text{ФД}}$ – сопротивление нагрузки фотодиода (Ом).

С учетом выражения (2) выражение (3) можно записать следующим образом:

$$P_{\text{РЧ}} = r_{\text{ФД}}^2 \times P_{\text{ОПТ}}^2 \times R_{\text{ФД}}. \quad (4)$$

Анализируя выражение (4) можно сделать вывод о том, что уменьшение оптической мощности в 1 дБ сопровождается уменьшением радиочастотной мощности на 2 дБ.

Другая важная причина снижения эффективности передачи РЧ сигнала через волоконно-оптическое приемо-передающее устройство – это сильная зависимость лазерного излучающего диода от температуры. В этом случае от

температуры зависит не только коэффициент передачи сквозного приемо-передающего тракта, но и ряд других важных параметров. Так, с возрастанием температуры уменьшается динамический диапазон сквозного тракта по гармоническим искажениям (англ. – *OMI*) и по интермодуляционным искажениям третьего порядка (англ. – *IIP3*), уменьшается динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (англ. – *SFDR*), возрастает плотность шума (*NF*) и т.д.

На рисунке 3 представлены схемы, поясняющие зависимость эффективности лазерного диода от температуры в виде его ватт - амперной характеристики.

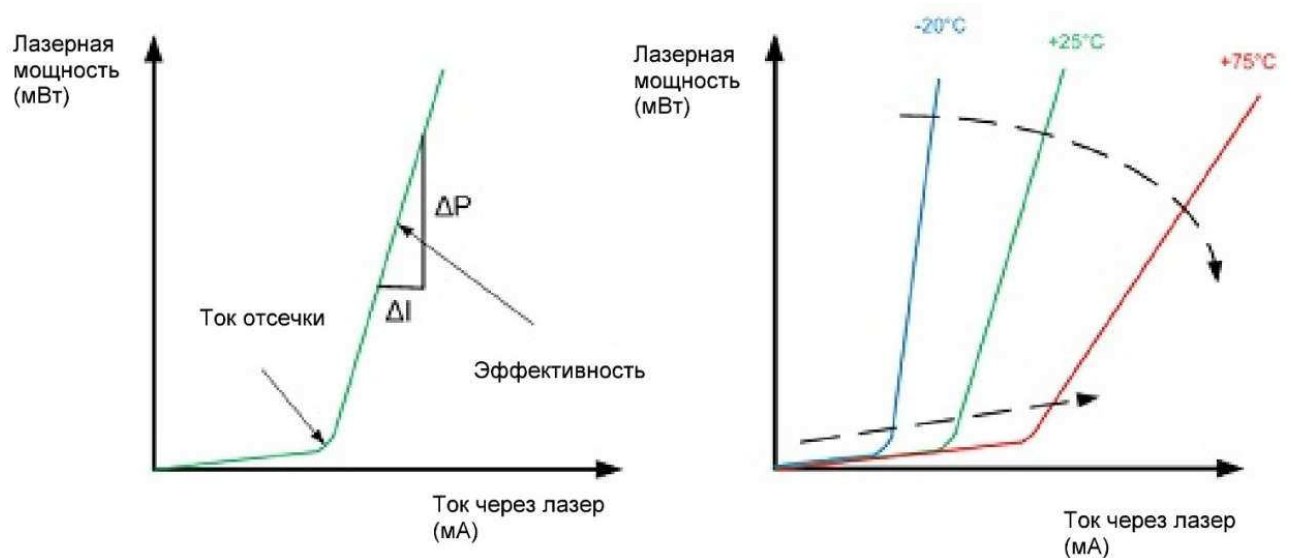


Рисунок 3 – Зависимость ватт - амперной характеристики лазерного диода от температуры

Как можно видеть из рисунка 3 повышение температуры приводит к уменьшению угла наклона выходной ватт - амперной характеристики лазерного диода, что соответственно приводит к изменению не только выходной мощности, но параметров *OMI*, *IIP3*, *SFDR*, *NF* и т.д.

В настоящее время существует несколько способов устранить негативное влияние зависимости параметров лазерного диода от температуры, но главным из них является способ интегрального исполнения конструкции лазерного диода, совместно с термоэлектрическим охладителем Пельте (ТЕС). Подобные

конструкции обеспечивают стабильную работу лазерных диодов в широком интервале температуры (типичное значение от -40 C^0 до $+80\text{ C}^0$).

Параметры волоконно-оптической линии передачи, такие, к примеру, как OMI, IP3, SFDR, во многом зависят от уровня шумов в линии.

Принято считать, что нижняя граница мощности шума идеального приемника или передатчика определяется величиной -174 дБм. Плотность мощности шума на входе волоконно-оптической линии передачи $P_{ш(ВХ)}$ (англ. – Equivalent Link Input Noise Density (EIN)) (дБм/Гц), зависит от плотности мощности шума на выходе приемопередающей линии $P_{ш(ВЫХ)}$ (англ. – Equivalent Link Output Noise Density (EON)) (дБм/Гц) и коэффициента передачи линии $K_{ОВК}$:

$$P_{ш(ВХ)} = P_{ш(ВЫХ)} - K_{ОВК} \quad (5)$$

где $K_{ОВК}$ определяется формулой (1). Заметим, что $P_{ш(ВЫХ)}$ всегда можно измерить, используя анализатор спектра.

Величина $P_{ш(ВХ)}$ зависит от шумов передатчика $P_{ш(ПРД)}$ (ЛОИШ – лазерная относительная интенсивность шума) (англ. – Laser Relative Intensity Noise (RIN)) (дБм/Гц), сформированных лазером вследствие спонтанной эмиссии фотонов, которая приводит к некогерентности светового потока, шума фотодиода $P_{ш(ФД)}$ (дробового шума) (англ. – PD shot Noise) (дБм/Гц) и от шумов приемника (включая усилитель, электрические соединения и т.д.) в основном обусловленных зависимостью усилителя от температуры $P_{ш(t)}$ (теплового шума приемника) (англ. – receiver Thermal Noise) (Вт/Гц).

Т.е. в целом выражение для $P_{ш(ВХ)}$ определится выражением:

$$P_{ш(ВХ)} = P_{ш(ПРД)} + P_{ш(ФД)} + P_{ш(t)} \text{ (Вт/Гц)}. \quad (6)$$

Величина параметра NF, определяющая отношение сигнал/шум может быть определена формулой [8]:

$$NF = P_{ш(вх)} + 174 \text{ дБм/Гц}. \quad (7)$$

На рисунке 4 представлены зависимости, поясняющие вклад отдельных шумов в общий шум, создаваемый всей волоконно-оптической линией связи.

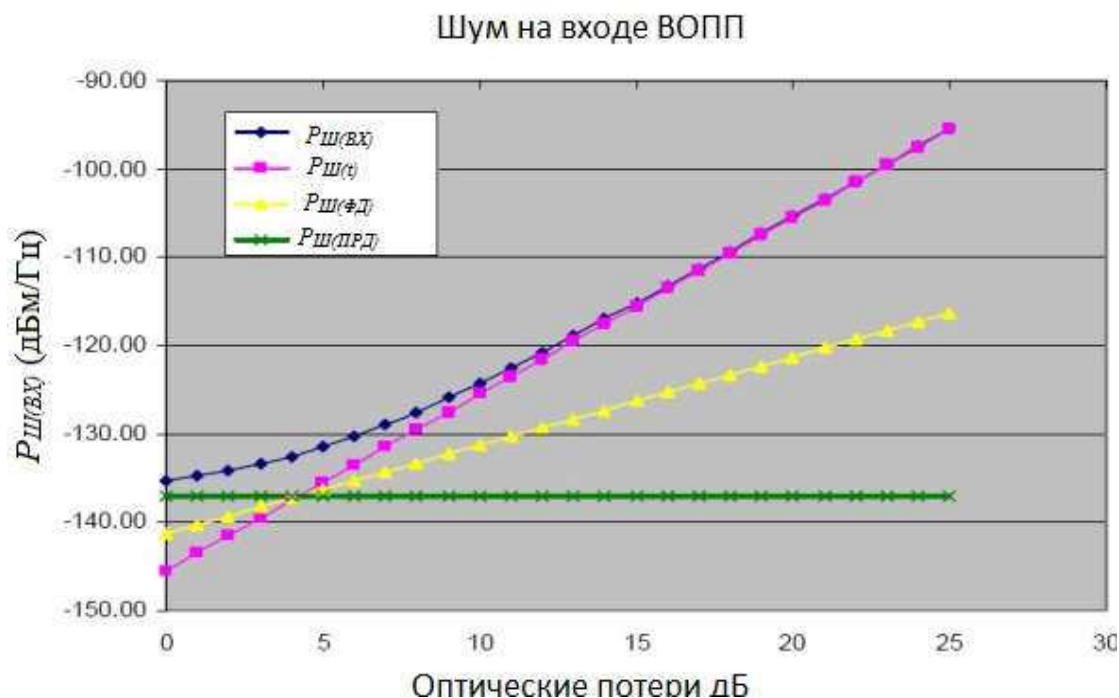


Рисунок 4 – Соотношение шума на входе линии и оптических потерь

Как видно из формул (6, 7), улучшить отношение сигнал/шум путем снижения влияния NF можно осуществить, включив в цепь передатчика, МШУ.

Для качественной передачи РЧ сигнала через волоконно-оптическую линию связи значительную роль играет значение величины динамического диапазона свободного от искажений, связанных с нелинейностью усилителей в линии. SFDR определяет сигнал минимальной мощности, который может быть отделен от наибольшего уровня помех NF. Чем больше значение SFDR, тем больше динамический диапазон для процессов прохождения РЧ сигналов через волоконно-оптическую линию.

В общем случае, значение SFDR можно оценить, используя следующее выражение:

$$SFDR = 2/3 \times (IIP3 - P_{ш(вх)} - 10 \lg (BW)), \quad (8)$$

$$IP3 = OIP3 - K_{ОВК} \quad (9)$$

где $IP3$ – входная мощность интермодуляционных продуктов третьего порядка;

BW – относительная полоса частот занимаемая передаваемым РЧ сигналом;

$OIP3$ – выходная мощность интермодуляционных продуктов третьего порядка.

Таким образом, выражения (1) – (8) позволяют выполнять оценки, необходимые при разработке технических решений волоконно-оптических приемопередающих линий связи [9].

1.4 Шумы ВОЛС с прямой модуляцией лазерного излучения

Аналоговые ВОЛС имеют определенные недостатки. К наиболее существенным из них относятся линейные и нелинейные искажения выходного сигнала. Линейные искажения проявляются в неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и как следствие, в подавлении сигнала до уровня шума на выходе из волокна при определенных частотах модуляции. Подобное поведение АЧХ обусловлено дисперсией групповой скорости лазерного излучения в волокне и эффектом «чирпирования», связанного с изменением показателя преломления кристалла полупроводникового лазера и его усиления под действием модулирующего РЧ поля [10 – 12].

Нелинейные искажения обусловлены нелинейно-оптическими явлениями в оптоволокне, связанными с изменениями свойств материала оптоволокна при больших мощностях излучения под действием распространяющегося в нем света большой интенсивности. Кроме того, дисперсия групповой скорости электромагнитных волн в оптоволокне приводит к нелинейным искажениям даже при малых интенсивностях излучения, в результате чего в сигнале на

выходе фотодетектора, кроме основной гармоники на частоте модуляции, появляются высшие гармоники этой частоты [13].

В приемо-передающей аналоговой ВОЛС мощность шума на выходе N_{out} определяется шумами источника на входе линии N_{in} и добавочными шумами создаваемыми в самой линии N_G .

Мерой определения уровня шума передающей линии является коэффициент шума F .

Согласно определению коэффициент шума любого активного двух или четырехполюсника определяется выражением:

$$F = \frac{S_{in}/N_{in}}{S_{out}/N_{out}}, \quad (10)$$

где S_{in}/N_{in} – отношение сигнал/шум на входе;

S_{out}/N_{out} – отношение сигнал/шум на выходе ВОЛС.

Зависимость коэффициента шума F от уровня шума на входе описывается следующим выражением:

$$F = \frac{N_G + GN_{in}}{GN_{in}}, \quad (11)$$

где G – коэффициент передачи линии.

В спутниковых системах связи принято считать, что уровень шума на входе активной передающей линии создается преимущественно тепловыми шумами на выходе антенны и определяется следующим выражением (формула Найквиста):

$$N_{in} = kT_0\Delta f, \quad (12)$$

где k – постоянная Больцмана;

T_0 – опорная температура источника;

Δf – полоса частот, занимаемая передаваемым РЧ сигналом.

За опорную температуру источника принято считать 290 К, которая близка к средней температуре приемной антенны, направленной через атмосферу на передающую антенну.

С учетом формулы Найквиста выражение для коэффициента шума (принятым в качестве стандарта международной некоммерческой ассоциации специалистов в области техники, IEEE) принимает следующий вид:

$$F = \frac{N_G + GkT_0\Delta f}{GkT_0\Delta f}. \quad (13)$$

Уравнение позволяет найти мощность шума N_G создаваемого внутри ВОЛС, используя измеренные в ходе испытаний макета ВОЛС параметры S_{21} и NF , пользуясь следующими соотношениями:

$$S_{21} = 10\lg G, \quad NF = 10\lg F. \quad (14)$$

Общий шум на выходе ВОЛС N_{out} будет определяться суммой собственных шумов ВОЛС и шумов на входе:

$$N_{out} = N_G + GkT_0\Delta f. \quad (15)$$

С учетом выражений минимальная мощность шума на выходе ВОЛС может быть оценена формулой:

$$N_{out} = kT_0\Delta f(F + G - 1), \quad (16)$$

1.5 Особенности передачи стабильных сигналов частоты и времени в аналоговой ВОЛС

Основой передачи стабильных сигналов частоты и времени по ВОЛС является стабилизация таких характеристик этого канала как групповое время задержки распространения и сохранение высоких характеристик монохроматичности сигналов. Последняя характеристика оценивается экспериментально по дисперсиям Аллана для фиксированных временных интервалов усреднения (1 с, 10 с, 100 с, 1000 с и т.д.) специализированными приборами – частотными и фазовыми компараторами высокой точности. Сохранить высокие метрологические характеристики стандартов частоты и времени на удаленной стороне можно используя ВОЛС с замкнутой (по задержке) петель обратной связи.

В качестве стандартов частоты могут использоваться водородные, цезиевые, рубидиевые стандарты частоты, генерирующие радиочастотные сигналы стабильных частот и меток времени, либо оптические стандарты частоты, генерирующие высокостабильные по частоте следования пачки световых импульсов. Оптические стандарты частоты обладают преимуществами по сравнению с квантовыми стандартами частоты СВЧ-диапазона: эксперименты, связанные с измерением частоты при использовании лазеров, требуют меньшего времени, так как абсолютная частота в $10^4 - 10^5$ раз превышает не лазерные стандарты частоты. Абсолютная интенсивность и ширина резонансов, являющихся реперами частоты, в оптическом диапазоне в $10^5 - 10^6$ раз больше, чем в СВЧ - диапазоне, при одной и той же относительной ширине. Это позволяет создавать оптические стандарты частоты с более высокой кратковременной стабильностью частоты.

Ключевым элементом для передачи частоты через оптическое волокно является интерференционная волоконно-стабилизационная система для подавления колебаний фазы, возникающих вдоль волокна. Механические колебания и температурные изменения приводят к оптическим колебаниям

длины пути, следовательно, что приводит к изменению времени распространения, а значит, к появлению флуктуационных добавок фазы и частоты.

Для стабилизации частоты передаваемого сигнала используют систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Это система автоматического регулирования, подстраивающая частоту управляемого генератора так, чтобы она была равна частоте опорного сигнала.

2 Разработка и исследование аналоговой ВОЛС с прямой модуляцией РЧ сигнала для передачи сигналов опорной частоты 100 МГц

2.1 Цели и решаемые задачи

Основной целью работы является разработка и исследование параметров аналоговой ВОЛС с прямой модуляцией РЧ сигнала в сравнении с ВОЛС на базе OZ450, а также стабильности работы, разрабатываемой ВОЛС при передаче сигнала опорной частоты 100 МГц от водородного стандарта частоты и времени Ч1–1006.

В ходе проведения исследований решались следующие задачи:

- выполнить обзор литературы по теме «аналоговые оптические линии связи с прямой модуляцией излучения», с целью анализа устройств и процессов, влияющих на качество передачи сигналов;
- разработать схему экспериментальной установки ВОЛС, определить методику измерений;
- провести экспериментальные исследования зависимости S-параметров и коэффициента шума ВОЛС от температуры эксплуатации;
- выполнить исследования стабильности передачи сигнала опорной частоты 100 МГц от водородного стандарта частоты и времени Ч1-1006 путем измерения параметров дисперсии Аллана.

2.2 Результаты экспериментальных исследований

2.2.1 Состав ВОЛС

В состав исследуемых модификаций ВОЛС входят:

- волоконно-оптический передатчик РЧ сигналов (ПРД) ([изъято наименование предприятия]) – 1 шт.;
- волоконно-оптический передатчик РЧ сигналов (ПРД OZ) («Optical Zone», USA) – 1 шт.;

- волоконно-оптический приемник (ПРМ) ([изъято наименование предприятия]) – 1 шт.;
- волоконно-оптический приемник (ПРМ OZ) ((«OpticalZone», USA) – 1 шт.;
- оптоволоконный патчкорд FC/ APC – FC/APC SM 9/125 SX 3 М – 1 шт.

2.2.2 Перечень испытаний, выполненных на экспериментальной установке ВОЛС

Исследуемые аналоговые ВОЛС были подвергнуты ряду испытаний:

- а) проверка коэффициента передачи S_{21} ВОЛС ([изъято наименование предприятия]) в полосе пропускания 0.1 – 3 ГГц в сравнении с ВОЛС OZ450;
- б) проверка нестабильности коэффициента передачи S_{21} ВОЛС ([изъято наименование предприятия]) на частотах 140 МГц, 1500 МГц, 2000 МГц и 2500 МГц от температуры в диапазоне от минус 40 °C до +50 °C в сравнении с ВОЛС OZ450;
- в) проверка коэффициентов отражения S_{11} и S_{22} макета ВОЛС ([изъято наименование предприятия]) в полосе пропускания 0.1 – 3 ГГц в сравнении с ВОЛС OZ450;
- г) проверка коэффициента шума NF макета ВОЛС ([изъято наименование предприятия]) в полосе пропускания 0.1 – 3 ГГц в сравнении с ВОЛС OZ450;
- д) проверка нестабильности передачи сигнала опорной частоты 100 МГц от водородного стандарта частоты и времени Ч1-1006 по ВОЛС ([изъято наименование предприятия]).

Все испытания кроме испытаний пункта (б). проводились в нормальных условиях:

- температуре окружающей среды: -40 °C, 0 °C, +50 °C;
- относительной влажности от 75 %;
- атмосферном давлении в диапазоне от 96 кПа до 104 кПа (от 645 до 795 мм рт.ст.).

Испытания согласно пункту (б) проводились в специализированном термобоксе МНК-12НК.

2.2.3 Оборудование, приборы, использованные при испытаниях

В ходе испытаний макет использовались приборы, перечень которых приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Перечень приборов, использованных в ходе испытаний макета

№ п.п	Наименование приборов	Тип прибора	Количество, шт.
1	Измеритель коэффициента шума	X5M-18	1
2	Векторный анализатор цепей	S5048	1
3	Камера для температурных испытаний	MHK-12NK (Taiwan)	1
4	Водородный стандарт частоты;	Ч1-1006	1
5	Компаратор	VCH-314	1

2.2.4 Параметры макетов ВОЛС

2.2.4.1 Состав макета ВОЛС ([изъято наименование предприятия])

Принципиальная схема волоконно-оптического передатчика РЧ сигналов ([изъято наименование предприятия]) приведена на рисунке 6.

[изъято]
Рисунок 6 – Принципиальная схема ПРД

Основные параметры лазерного диода LDI-1310 DFB-10G-20\60, используемого в составе ПРД ([изъято наименование предприятия]) приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры LDI-1310 DFB-10G-20\60

Порог, мА	Мощность, мВт	Рабочий ток, мА	Напряжение, В	Ток ФД, мА	Крутизна, Вт/А	Длина волны, нм
6.61	10	51.67	1.29	0.3	0.22	1309

Принципиальная схема волоконно-оптического приемника ([изъято наименование предприятия]) представлена на рисунке 7.

([изъято])
Рисунок 7 – Принципиальная схема ПРМ

Основные параметры фотоприемного диода PDI-40-4G-K-R50-B-7-SM3-FA приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры PDI-40-4G-K-R50-B -7-SM3-FA

Чувствительность, А/Вт	Темновой ток, нА	Обр.отр., дБ	Условия
0.96	0.009	-64	5 В; 1548 нм

2.2.4.2 Состав макета ВОЛС («Optical Zone», USA)

Оптоволоконный трансивер (ОВТ) основан на волоконно-оптическом передатчике РЧ сигналов и приемнике OZ450 (Optical Zone, USA),. Основные параметры приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Основные параметры ОВТ, (ПРМ OZ450 и ПРД OZ450)

Параметры	Мин.	Номинальное значение	Макс.
Напряжение питания, В		12	
Ток питания ПРМ, мА		60	80
Ток питания ПРД, мА		155	175
Выходная оптическая мощность лазера, мВт		2	
Длина волны передатчика, нм		1310	
Длина волны приемника, нм		1310	
Частотная характеристика, дБ (30-2700 МГц)		±1,5	
Верхняя граница частоты, МГц		2700	3300
Нижняя граница частоты, МГц	1	30	
Входное/выходное сопротивление, Ом		50	
SFDR, (дБ/Гц) ^{2/3}		109	
Усиление РЧ сигнала	-1	0	+1
Входной уровень шума, дБм/Гц		-133	
Входная мощность интермодуляционных продуктов третьего порядка, дБм		31	

Общий вид ОВТ OZ450 представлен на рисунке 8.

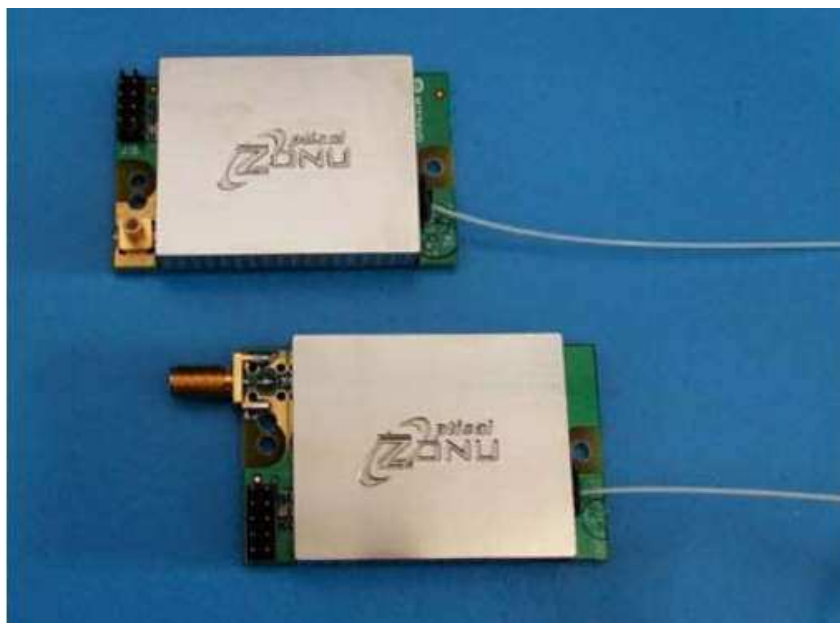


Рисунок 8 – ПРМ OZ450 и ПРД OZ450

2.3 Предварительная настройка модуля ПРД ([изъято наименование предприятия])

Перед проведением испытаний макета ВОЛС ([изъято наименование предприятия]) согласно пунктам 2.2.2 были выполнены предварительные пусконаладочные работы с целью оптимизации его работы.

В ходе оптимизации определялись зависимости мощности лазерного излучения и параметра S_{21} от тока потребления ПРД ([изъято наименование предприятия]).

Схема экспериментальной установки, на которой осуществлялась предварительная настройка модуля ПРД ([изъято наименование предприятия]), приведена на рисунке 9.

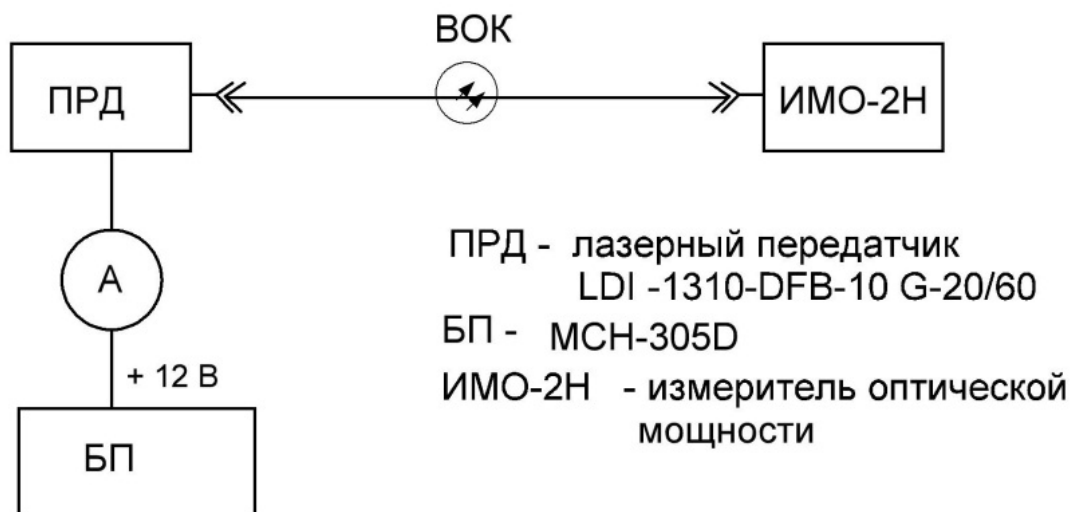


Рисунок 9 – Схема предварительной настройки ПРД ([изъято наименование предприятия])

Питание модуля ПРД ([изъято наименование предприятия]) осуществлялось от регулируемого блока питания постоянного тока МСН -305 В. Контроль за током потребления модуля осуществлялся мультиметром МУ65. Контроль за мощностью излучения лазера ПРД ([изъято наименование предприятия]) осуществлялся при помощи измерителя оптической мощности ИМО-2Н. Излучение ПРД в ИМО-2Н подавалась через оптоволоконный патчкорд FC APC – FC/APC SM 9/125 SX 3 М. На рисунке 9 представлены результаты исследований.

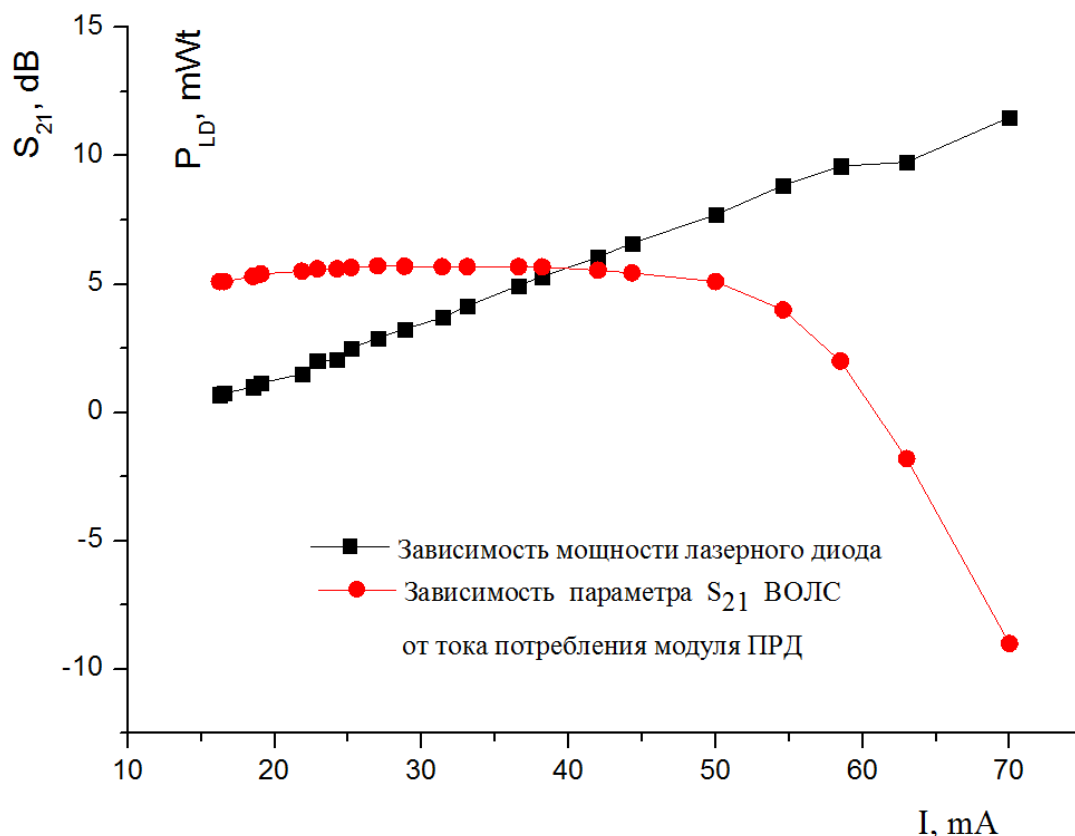


Рисунок 10 – Результаты исследований в ходе предварительной настройки ПРД ([изъято наименование предприятия])

Как можно увидеть из рисунка 10, в диапазоне токов потребления модулем ПРД ([изъято наименование предприятия]) от 20 мА до 50 мА сохраняется линейность ватт – амперной характеристики.

Коэффициент передачи S_{21} ВОЛС на основе исследуемого макета ОВТ ([изъято наименование предприятия]) сохраняет постоянную величину 5 дБ во всем диапазоне токов потребления модуля ПРД. Если предположить, что ток потребления модуля ПРД в основном обусловлен потреблением лазерного диода, можно сделать вывод о том, при модуляции РЧ сигналом выходной оптической мощности ПРД, оптимальным значением тока для сохранения высокого динамического диапазона является ток величиной 35 мА, соответствующий середине линейного участка зависимости S_{21} от тока потребления модулем.

2.4 Определение коэффициента шума ВОЛС

На следующем этапе предварительных испытаний ВОЛС определялись зависимости коэффициента шума NF и коэффициента передачи S_{21} на основе ВОЛС ([изъято наименование предприятия]) в диапазоне частот от 30 МГц до 3 ГГц. Измерения проводились при нормальных условиях: температура воздуха 25 °С, влажность 75 %.

Экспериментальная схема измерений представлена на рисунке 11.

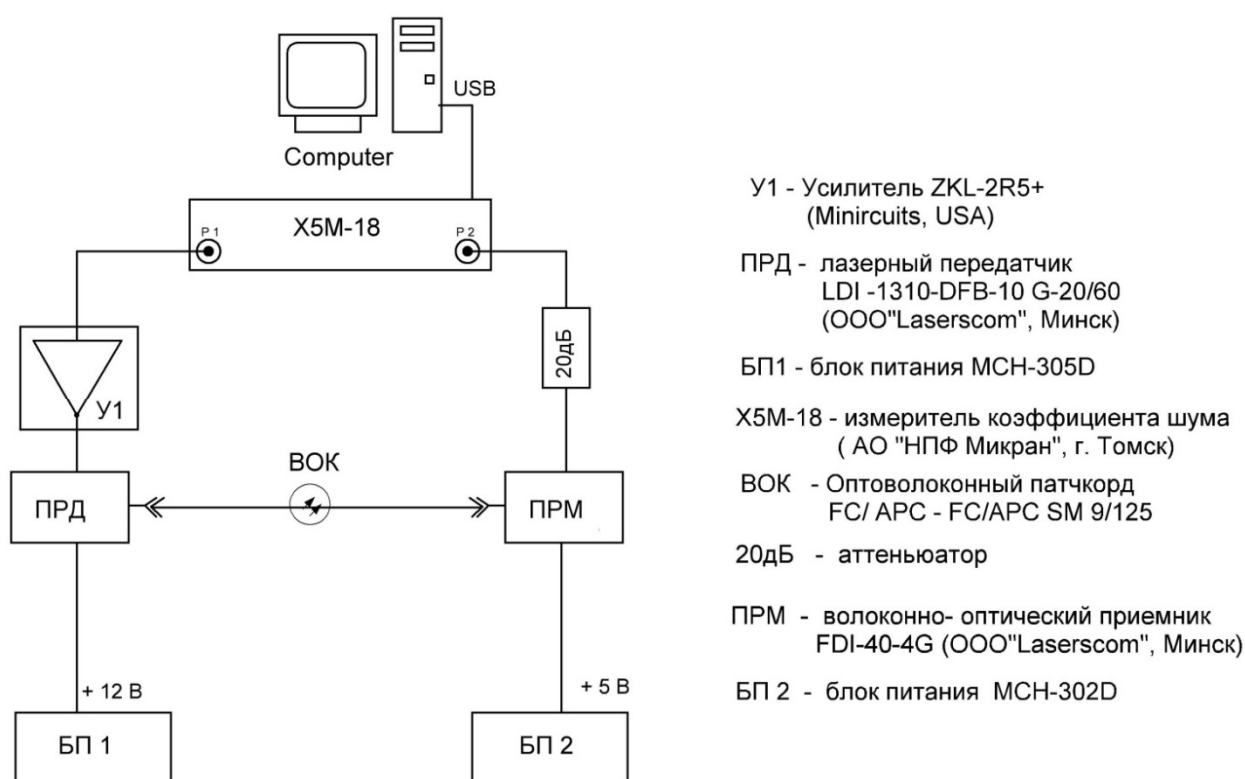


Рисунок 11 – Схема измерения NF и S_{21} ВОЛС

При проведении измерений параметров NF и S_{21} , в принципиальной схеме использовался широкополосный СВЧ усилитель ZKL-2R5D+ (Mini-Circuits). На рисунке 12 представлены результаты измерений коэффициента шума NF и коэффициента передачи S_{21} для усилителя.

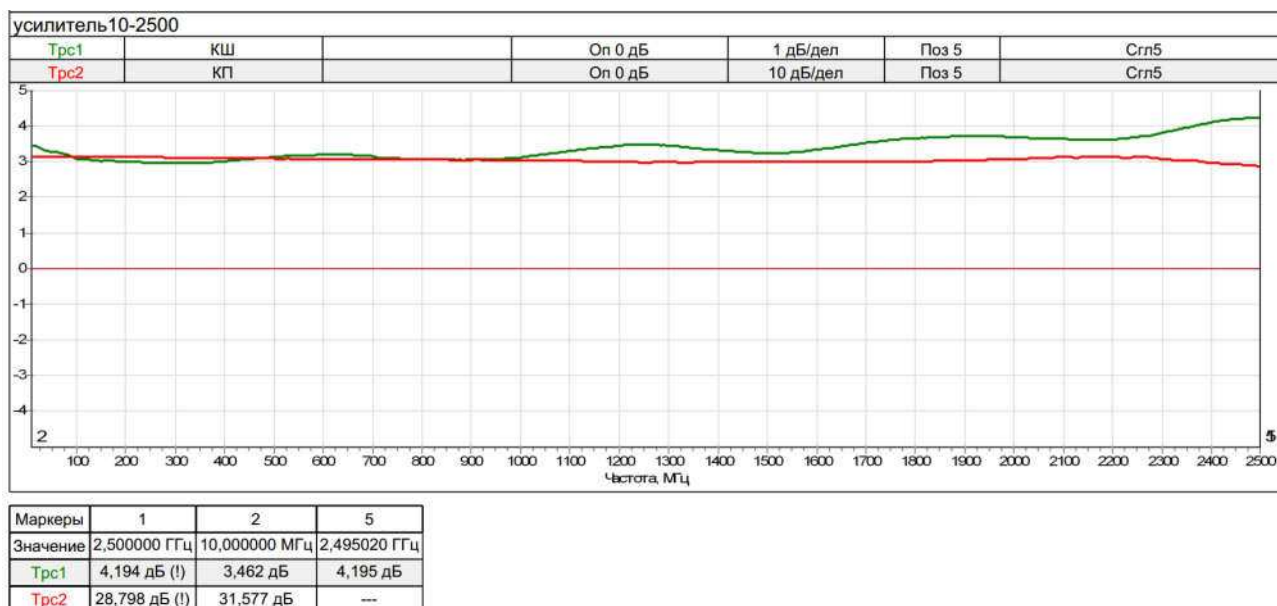


Рисунок 12 – Результаты измерений параметров NF и S_{21} для усилителя ZKL-2R5D+

Как можно видеть из рисунка 12, коэффициент шума NF усилителя не превышает 4 дБ в полосе частот 10 МГц – 3 ГГц, при этом коэффициент усиления S_{21} составляет величину 30 ± 1 дБ во всей полосе частот.

Применение усилителя было обусловлено необходимостью превышения шумоподобного сигнала из выхода измерителя коэффициента шума X5M-18 над уровнем собственных шумов ВОЛС.

При измерениях, с целью избежать перегрузки на входе 2 прибора X5M - 18 устанавливался аттенюатор 20 дБ. На рисунке 13 представлены результаты измерений параметров NF и S_{21} для исследуемого макета ВОЛС на основе ВОЛС ([изъято наименование предприятия]).

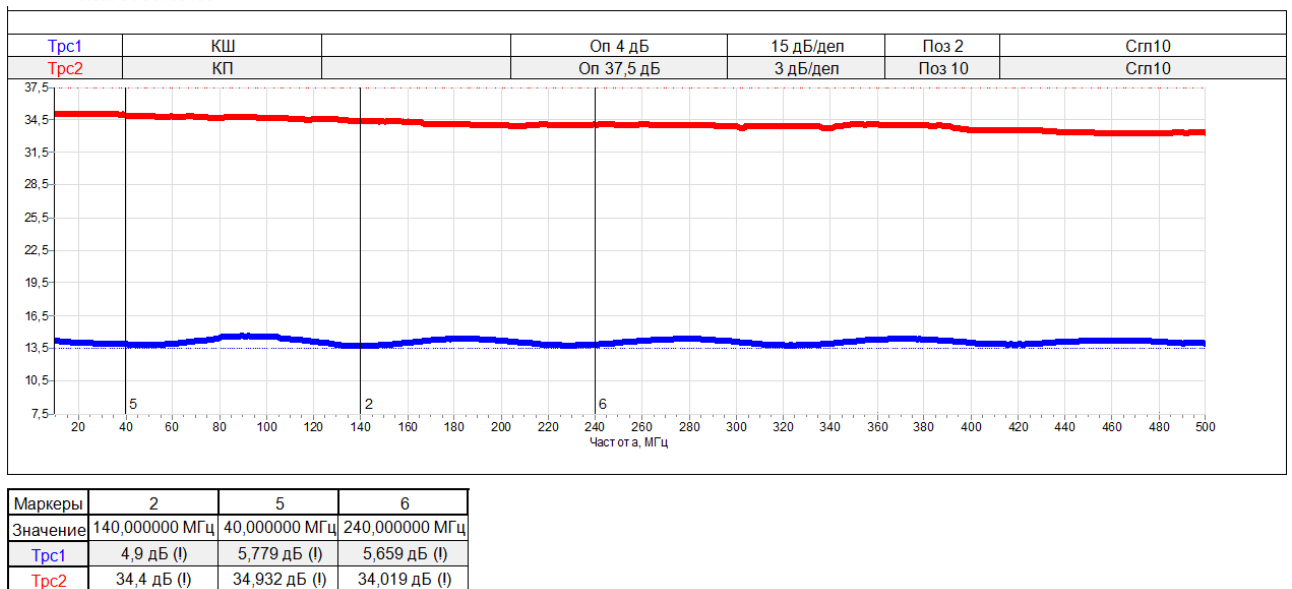


Рисунок 13 – Результаты измерений параметров NF и S_{21} для ВОЛС на основе ОВТ ([изъято наименование предприятия]) с усилителем

Реальное значение коэффициента шума NF для ВОЛС можно получить, воспользовавшись формулой Харальда Фриса:

$$F_{12} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}, \quad (17)$$

где F_{12} – суммарный коэффициент шума на выходе линии, содержащей два усилителя;

F_1 – коэффициент шума первого усилителя;

F_2 – коэффициент шума второго усилителя;

G_1 – коэффициент передачи первого усилителя.

Параметр F связан с параметром NF следующим соотношением:

$$NF = 10 \log_{10} F, \quad (18)$$

В нашем случае для схемы измерений, представленной на рисунке 11, выражение (17) можно представить следующим образом:

$$F_{\text{изм}} = F_{\text{ус}} + \frac{F_{\text{ВОЛС}} - 1}{G_{\text{ус}}}. \quad (19)$$

Из формулы (19) можно получить выражение для $F_{ВОЛС}$:

$$F_{ВОЛС} = G_{yc}(F_{изм} - F_{yc}) + 1. \quad (20)$$

Пользуясь результатами измерений, представленными на рисунке 13, можно определить значение NF для ВОЛС.

$$NF_{ВОЛС} = 10 \log_{10} F = 32 \text{ дБ.}$$

Коэффициент передачи S_{21} для ВОЛС на основе ОВТ ([изъято наименование предприятия]) с учетом усилителя составлял величину $S_{21} = 3,5 \pm 1$ дБ.

2.5 Исследование зависимости влияния рабочей температуры ВОЛС на коэффициенты передачи

На данном этапе испытаний, исследовались зависимости коэффициента передачи S_{21} ВОЛС на основе ВОЛС ([изъято наименование предприятия]) от температуры эксплуатации. С целью сравнения опытных образцов с существующими аналогами проводились аналогичные испытания с ВОЛС с использованием ОВТ OZ450.

Схема испытаний приведена на рисунке 14.

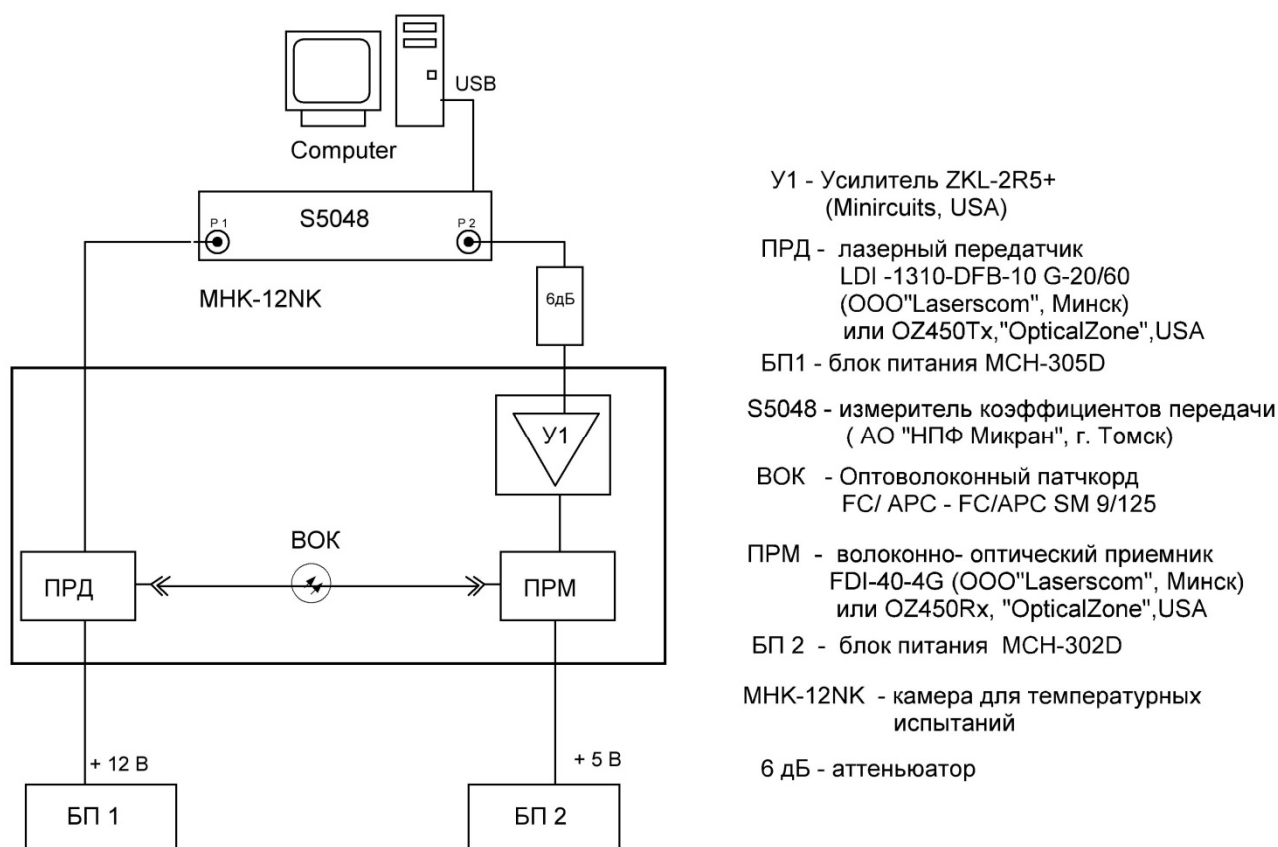


Рисунок 14 – Схема температурных испытаний

В ходе испытаний измерялись значения параметров S_{11} , S_{21} , S_{22} при температурах минус 40 °С, 0 °С, +50 °С в камере для температурных испытаний.

На рисунках 15 (а, б, в) – 16 (а, б, с) приведены примеры полученных результатов. Значения S_{21} приведены с вычетом коэффициента усиления усилителя 30 дБ.

Значения параметра S_{21} необходимо увеличить на величину 6 дБ, так как по входу 2 измерителя S5048, т.к. был установлен аттенюатор 6 дБ для предотвращения перегрузки по мощности входного радиочастотного сигнала.

На рисунке 15 (а, б, в) приведены зависимости параметров S_{11} , S_{21} , S_{22} при температурах минус 40 °С, 0 °С, +50 °С, измеренные для приемо-передающих устройств OZ450.

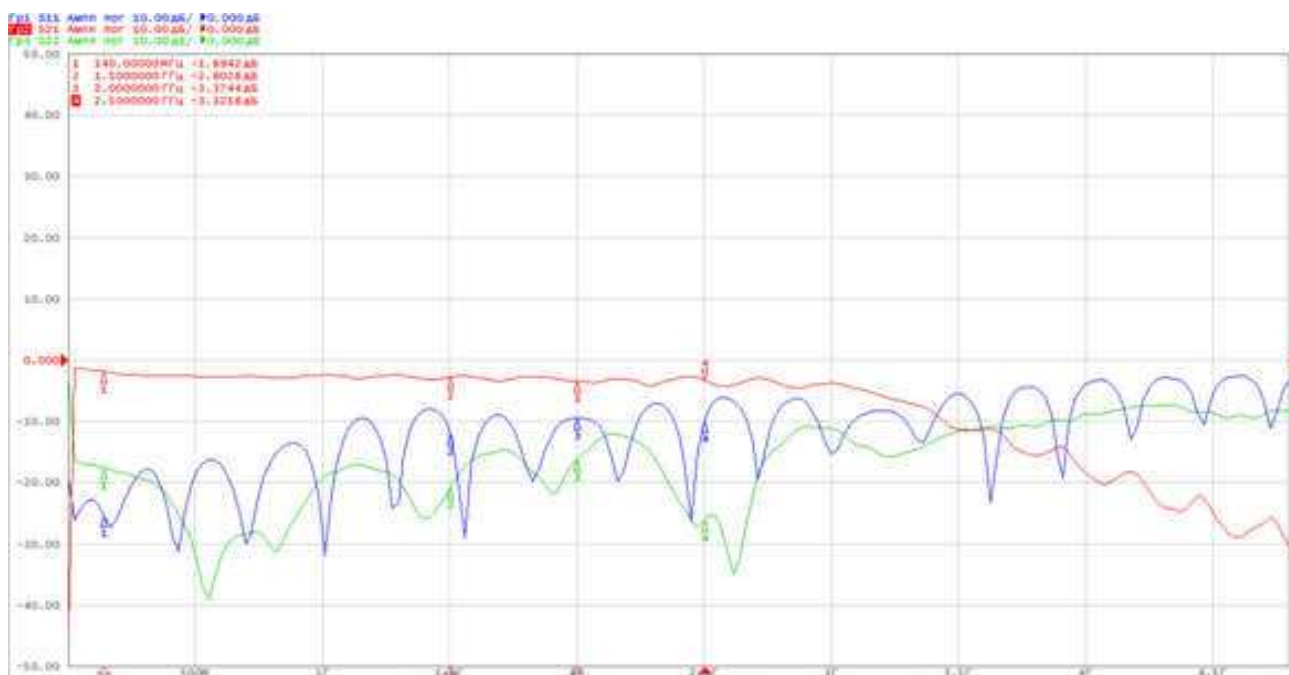


Рисунок 15 а – Результаты измерения S-параметров ОБТ OZ450 при $T = -40^{\circ}\text{C}$

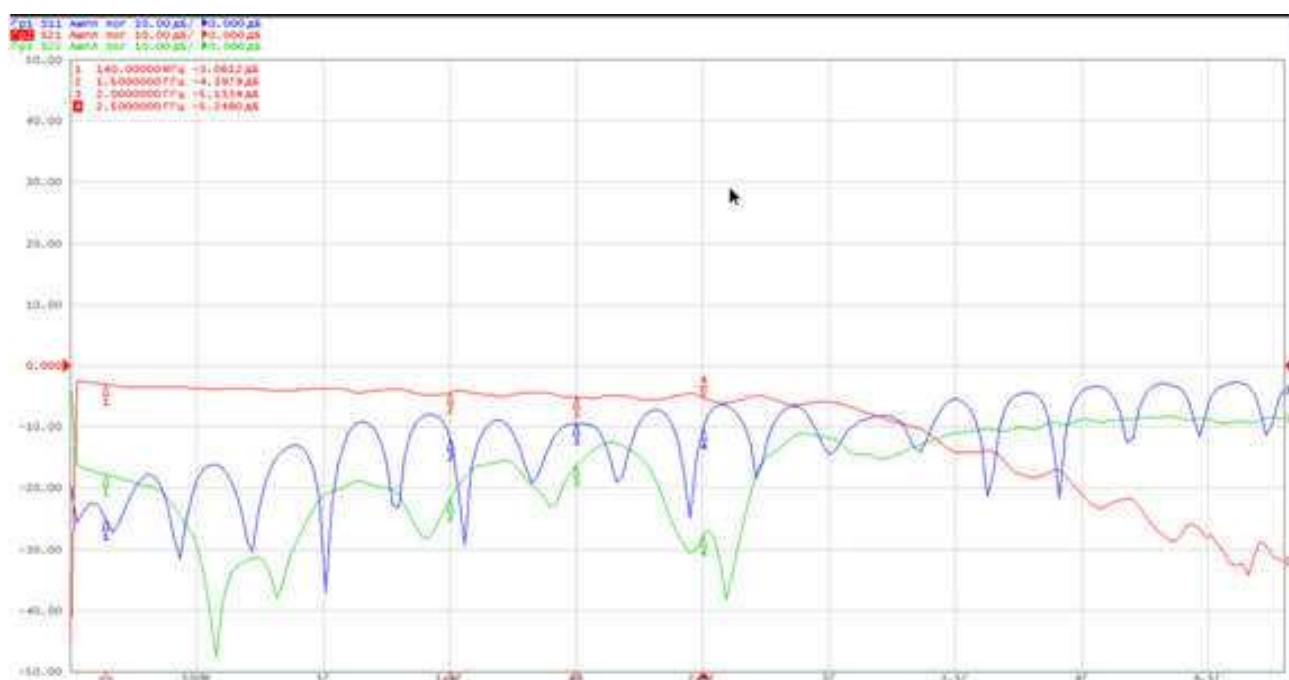


Рисунок 15 б – Результаты измерения S-параметров ОБТ OZ450 при $T = +10^{\circ}\text{C}$

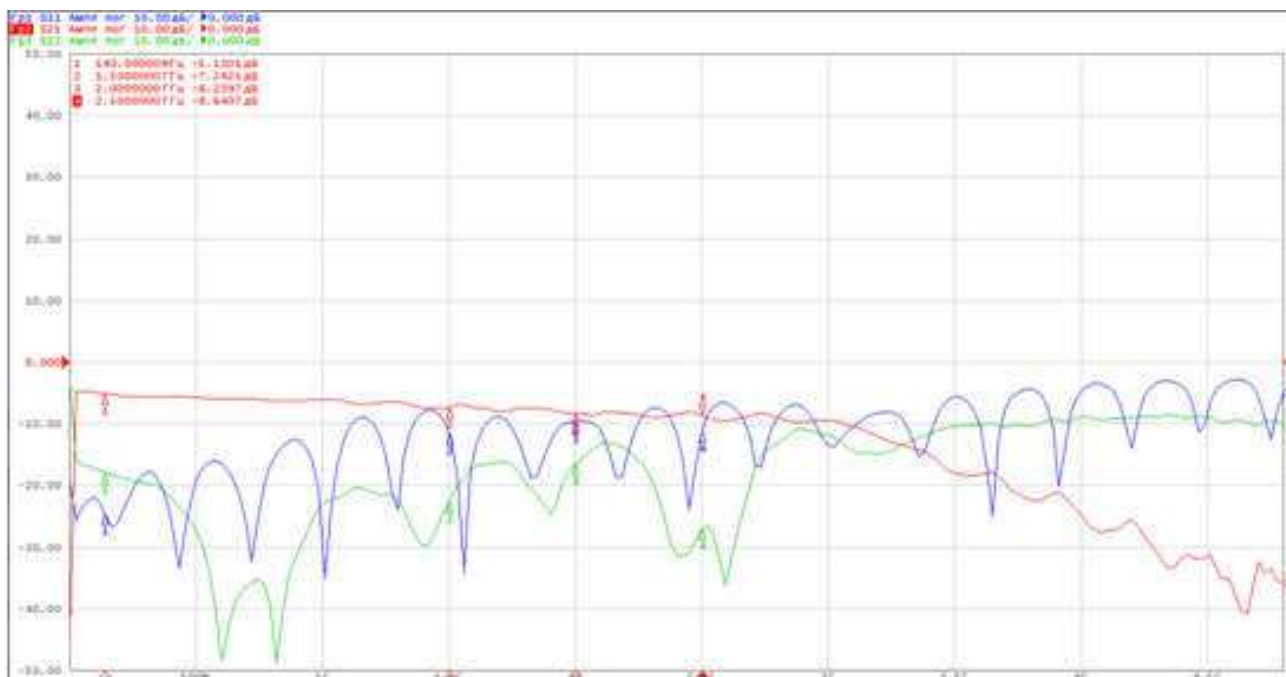


Рисунок 15 в – Результаты измерения S-параметров ОВТ OZ450 при $T = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рисунке 16 (а, б, в) приведены зависимости параметров S_{11} , S_{21} , S_{22} при температурах минус $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, измеренные для ОВТ ([изъято наименование предприятия]).

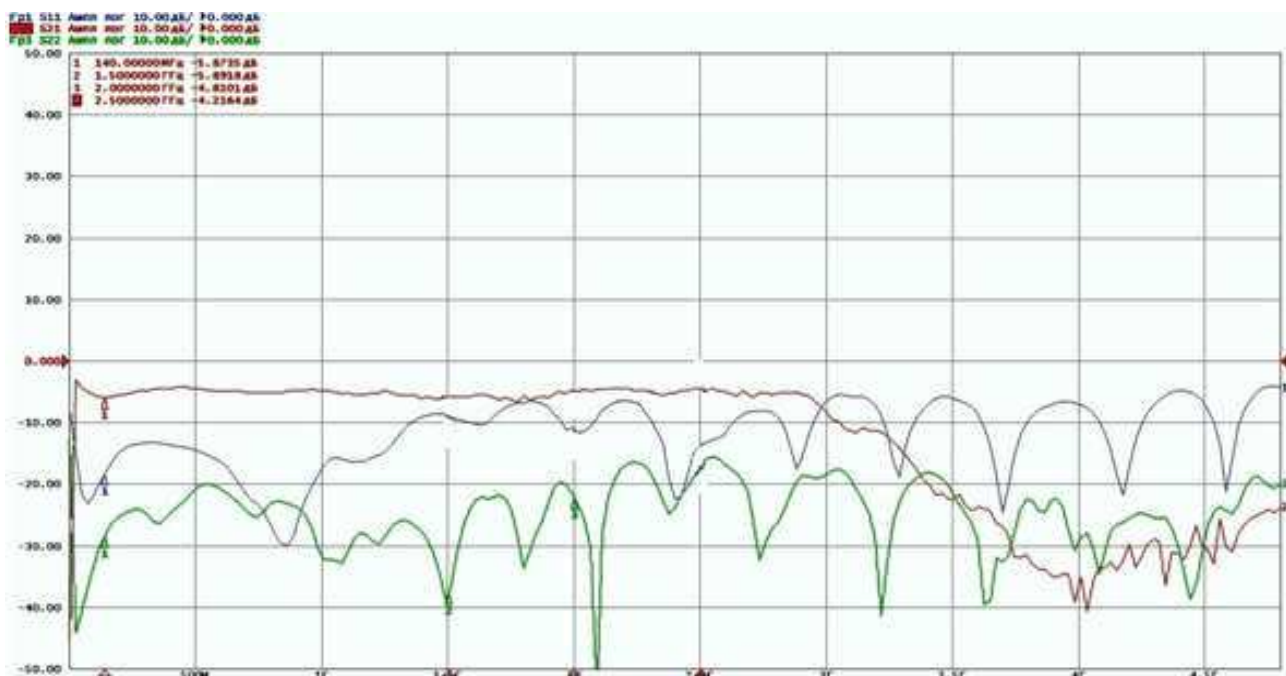


Рисунок 16 а – Результаты измерения S-параметров ОВТ ([изъято наименование предприятия]) при $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$

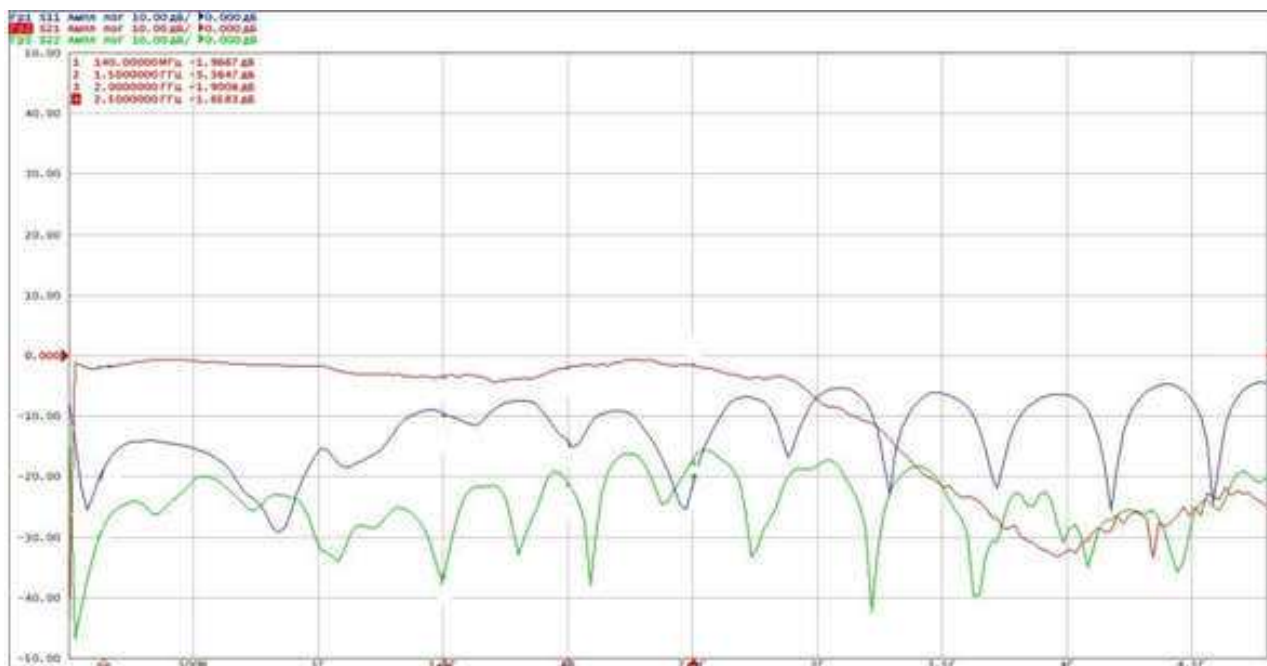


Рисунок 16 б – Результаты измерения S-параметров ОВТ ([изъято наименование предприятия]) при $T = +10^{\circ}\text{C}$

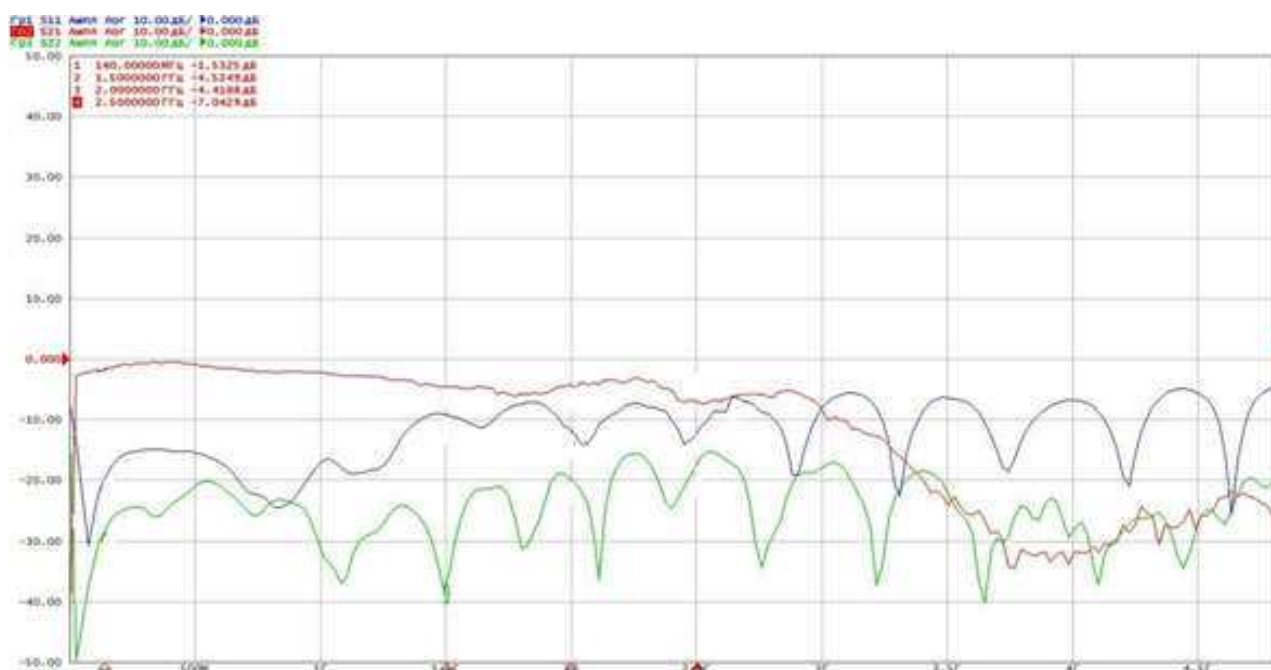


Рисунок 16 в – Результаты измерения S-параметров ОВТ ([изъято наименование предприятия]) при $T = +50^{\circ}\text{C}$

Сравнивая графические результаты, приведенные на рисунках 15 и 16 можно с уверенностью говорить, о том входе испытаний оптоволоконные устройства, разработанные на [изъято наименование предприятия], как минимум не хуже устройств OZ450.

На рисунке 17 приведены значения разности коэффициентов передачи ΔS_{21} , измеренных при температуре -40°C и $+50^{\circ}\text{C}$ на частотах РЧ сигнала от 30

МГц до 2500 МГц для ОВТ ([изъято наименование предприятия]) и ОВТ ОZ450. Время выдержки устройств, при этих температурах – 1 час.

[изъято]

Рисунок 17 – Разности коэффициентов передачи, для ОВТ и ОZ450, измеренных при температурах - 40⁰С и +50⁰С

2.6 Результаты сравнения испытаний макетов ВОЛС

В ходе предварительных испытаний макета ОВТ ([изъято наименование предприятия]) проводились измерения параметров оптической линии согласно перечню испытаний, приведенному в пунктах 2.2.2. Параллельно испытаниям ОВТ проводились измерения приемо-передающего комплекта на основе оптоволоконных модулей ОZ450. Основные результаты измерений приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Основные параметры ОВТ

	Наименование параметра	ОВТ	ОZ450
1	Коэффициент передачи S_{21} в полосе пропускания 0.1–3 ГГц, дБ	2±1	2±1
2	Нестабильность параметра S_{21} (ΔS_{21}) на частотах 140 МГц, 1500 МГц, 2000 МГц и 2500 МГц от температуры в диапазоне от минус 40 С ⁰ до +50 С ⁰ , дБ	-3,21 -5,34	-5,1 -8,64
3	Параметр S_{11} в полосе пропускания 0.1–3 ГГц, дБ	-10±2	-8±2
4	Параметр S_{22} в полосе пропускания 0.1 – 3 ГГц, дБ	-15±4	-15±4
5	Коэффициент шума в полосе пропускания 0.1–3 ГГц, дБ	32	32

Из таблицы 7 можно заметить что ОВТ ([изъято наименование предприятия]) и ОZ450 имеют схожие характеристики, но по отношению к температурным воздействиям ОВТ ([изъято наименование предприятия]) является более устойчивым в сравнении с ОZ450.

2.7 Исследование стабильности передачи сигнала опорной частоты 100 МГц от водородного стандарта частоты Ч1-1006

Сравнительный анализ параметров ВОЛС от температуры позволил сделать выбор ОВТ ([изъято наименование предприятия]) для проведения исследования стабильности передачи сигнала опорной частоты 100 МГц от водородного стандарта частоты и времени Ч1–1006.

Для этого при помощи компаратора с использованием стандартных методик измерялись значения среднеквадратичных двухвыборочных отклонений (СКДО) (англ. –Allan variance) для пары сигналов: сигнала с выхода стандарта частоты и его же, прошедшего через ВОЛС. Регистрировались значения СКДО при усреднении выборок пар сигналов с интервалом времени 1 с, 10 с, 20 с, 50 с, 100 с, 200 с, 500 с, 1000 с.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 18.

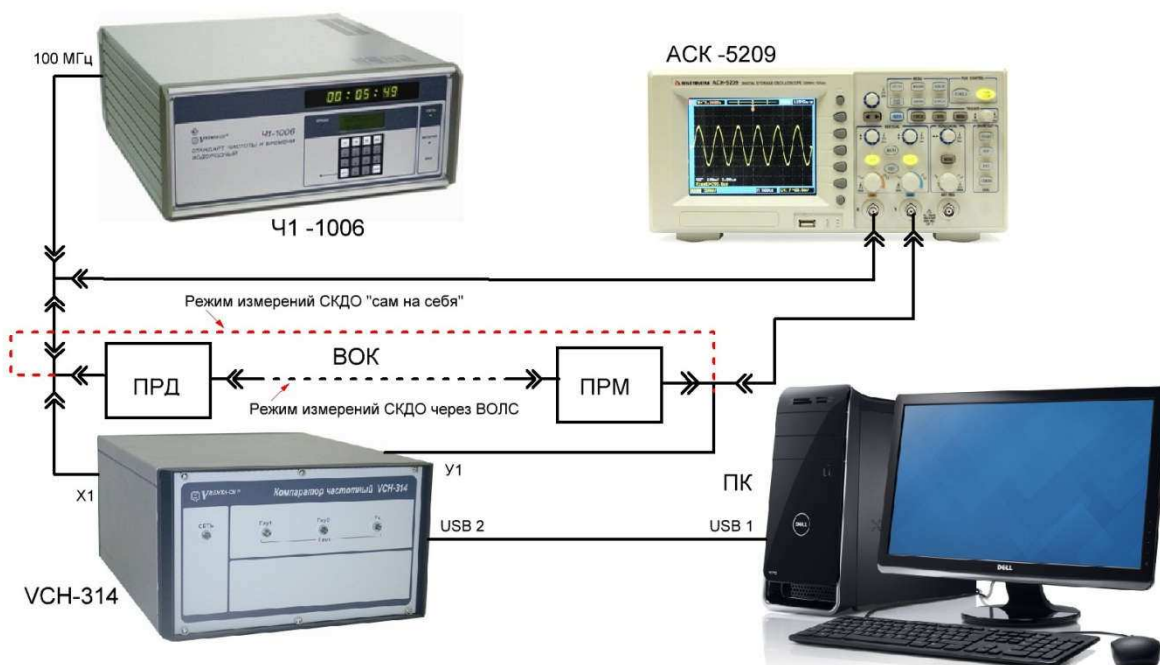


Рисунок 18 – Схема измерительной установки

Функциональная блок-схема измерительной установки состояла из водородного стандарта частоты Ч1-1006, компаратора VCH-314, волоконно-оптического приемо-передатчика ([изъято наименование предприятия]), визуальный контроль за формой сигнала осуществлялся с помощью осциллографа АСК-5209.

Результаты измерений значений СКДО при передаче сигнала опорной частоты 100 МГц от водородного стандарта частоты через ВОЛС и в режиме работы «сам на себя» представлены на рисунке 19 и 20. Режим «сам на себя» означал, что сигнал опорной частоты делился на два при помощи разветвителя 3 дБ и подавался одновременно на вход «Х» и вход «У» компаратора.

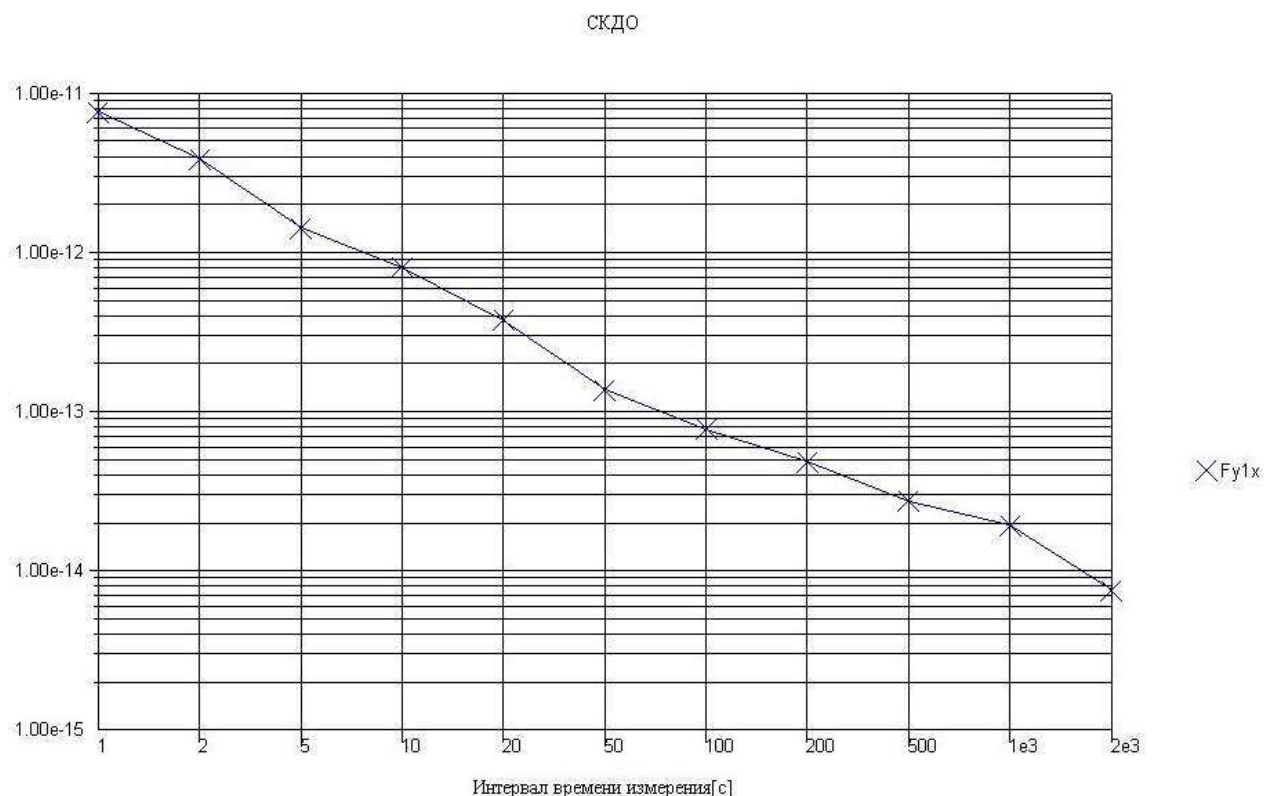


Рисунок 19 – СКДО ВОЛС при использовании ОВТ ([изъято наименование предприятия])



Рисунок 20 – Значения СКДО в режиме проверки «сам на себя»

Результаты СКДО ВОЛС показали, что при использовании ОВТ ([изъято наименование предприятия]) в метке времени 1 с дисперсия Аллана составила величину $3 \cdot 10^{-11}$, режиме работы «сам на себя» дисперсия Аллана составила $6 \cdot 10^{-12}$.

2.8 Основные выводы экспериментальных исследований

В ходе экспериментальных исследований была разработана схема ВОЛС (ОВТ) для передачи аналоговых сигналов с прямой модуляцией.

Проведены измерения основных параметров разработанной схемы ОВТ в сравнении с ВОЛС на основе прием-передающих устройств OZ450.

Основные результаты измерений приведены в таблице 7. Как можно увидеть из таблицы 7, величины коэффициентов передачи и коэффициентов шума приблизительно одинаковы для обеих схем. По отношению к работе ВОЛС при эксплуатации в диапазоне рабочих температур от минус 40°C до плюс 60°C предпочтение можно отдать ВОЛС на основе ОВТ ([изъято

наименование предприятия]), что обусловлено по видимому большей надежностью лазерных диодов, изготовленных ООО «Лазерском» (Минск, Беларусь) по сравнению с диодами, входящими в состав OZ450.

Применение ОВТ для передачи сигналов опорных частот от водородного стандарта частоты ухудшает стабильность передаваемых частот, что очевидно обусловлено значительным коэффициентом шума (порядка 30 дБ). В случае использования ВОЛС для передачи аналоговых сигналов малой мощности в диапазоне от минус 63 дБ/мВт до минус 10 дБм/мВт (например – от антенного модуля БИС ГЛОНАСС), применение СВЧ усилителя с усилением порядка 30 дБ может привести к уменьшению шумов ВОЛС в целом. При передаче по ВОЛС сигналов опорной частоты при стандартной выходной мощности 10 дБ/мВт от водородного стандарта Ч1-1006 применение усилителя может привести к выходу из строя лазерного диода.

Таким образом, основываясь на анализе экспериментальных результатов, приведенных выше, можно сделать вывод о целесообразности применения внешней модуляции для передачи по ВОЛС сигналов опорных частот для применения в системах БИС ГЛОНАСС.

Стабильность работы ВОЛС с использованием внешних модуляторов при передаче синхросигналов исследовалась ранее [14] и результаты исследований показали, что такие ВОЛС слабо влияют на значения СКДО, как основной показатель стабильности передачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы над магистерской диссертацией были получены следующие результаты:

- созданы макеты аналоговой ВОЛС на основе ОВТ ([изъято наименование предприятия]) и OZ450 (Optical Zonu);

- разработаны методики испытаний и исследованы коэффициенты передачи и коэффициент шума (NF) двух модификаций ВОЛС. При измерениях шума ВОЛС была использована методика оценки шума, использующая формулу Харальда Фриса;

- по результатам экспериментальных исследований сделан вывод, что ВОЛС на основе приемо-передатчика разработки [изъято наименование предприятия] является более устойчивым к температурным воздействиям, в отличие от ОВТ OZ450;

- с целью проверки пригодности использования ВОЛС с прямой модуляцией лазера были проведены измерения значений СКДО (дисперсии Алана) в сравнении с нестабильностью работы водородного стандарта частоты Ч1–1006. Измерения показали, что работа ВОЛС ухудшает стабильность прохождения опорного сигнала 100 МГц, что связано с высоким значением шума ($NF \approx 30$ дБ) приемо-передающих устройств в составе ВОЛС;

- по результатам исследований можно сделать вывод о том, что для передачи сигналов опорных частот для БИС наземного сегмента ГЛОНАСС целесообразно использовать передающие волоконно оптические устройства с внешней модуляцией излучения, например на основе эффекта Поккельса в кристаллах, так как они не содержат резистивных (основных) источников шума на входе ВОЛС.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- IP3 – Входная мощность интермодуляционных продуктов третьего порядка
- NF – Коэффициент шума
- ОМІ – Динамический диапазон сквозного тракта по гармоническим искажениям
- SFDR – Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих
- VCO – Генератор, управляемый напряжением
- АЧХ – Амплитудно-частотная характеристика
- БИС – Беззапросная измерительная система
- ВОЛС – Волоконно-оптическая линия связи
- ВОПП – Волоконно-оптический приемопередатчик
- ГЛОНАСС – Глобальная навигационная спутниковая система
- ЛОИШ – Лазерная относительная интенсивность шума
- МШУ – Малошумящий усилитель
- ОВК – Оптоволоконный конвертор
- ОВТ – Оптоволоконный трансивер
- ПРД – Волоконно-оптический передатчик
- ПРМ – Волоконно-оптический приемник
- РЧ – Радиочастотный (сигнал)
- СВЧ – СВЧ – Сверхвысокочастотный (сигнал)
- СКДО – Среднее квадратичное относительное двухвыборочное отклонение (частоты)
- ФАПЧ – Фазовая автоподстройка частоты

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петрова, А.И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования: изд. 3-е, перераб. / А.И. Петрова, В.Н. Харисова. – Москва: Радиотехника, 2005. – 688 с.
2. Логачев, Н. А. Космические навигационные системы: лаб. практикум / Н.А. Логачев. – Москва. : Мир связи, 2007. – 203 с.
3. Глонакс систем [Электронный ресурс] – Режим доступа :<http://www.glonax.ru>.
4. Федеральное космическое агентство [Электронный ресурс] / Королев. ин-т. – Режим доступа: <http://glonass-iac.ru>.
5. Гордеев, И. И. Кабели связи : учебник / И. И. Гордеев. – Москва : Энергия, 1976. – 272 с.
6. Складов, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи : учебник / О. К. Складов. – Москва : Солон-Пресс, 2004. – 272 с.
7. Фриман, Р. И. Волоконно-оптические системы связи : учебник / Р. И. Фриман. – Москва : Техносфера, 2007. – 512 с.
8. Основы измерения коэффициента шума в радиочастотном и микроволновом диапазонах [Электронный ресурс] / Заметки по применению 51-1 – Электронный журн. Agilent Technologies. – Режим доступа: <http://www.agilent.com>.
9. RFOverFiberDesign [Электронный ресурс] : GuideOverview. / VanNuys, SA. ин-т. – Электрон. журн. VanNuys. – Режим доступа: <http://www.opticalzonu.com>.
10. Bjerkan, L. Measurement of laser parameters for simulation of high-speed fiberoptic systems / L. Bjerkan, A. Royset, L. Hafskjaer, D. Myhre // Journal of Lightwave Technology, 1994. – № 14. – С. 839-850.
11. Royset, A. Use of dispersive optical fiber for characterization of chirp in semiconductor lasers / A. Royset, L. Bjerkan, D. Myhre, L. Hafskjaer // Electron. Lett., 1994. – № 30. – С. 710-712.

12. Srinivasan, R. C. On using fiber transfer functions to characterize laser chirp and fiber dispersion / R. C. Srinivasan, J. C. Cartledge // IEEE Photon. Technol. Lett., 1995. – № 7. – С. 1327-1329.
13. Agrawal, G. P. Nonlinear Fiber Optics // G. Agrawal – P. New York: Academic Press, 2013. – 648 p.
14. Владимиров В. М. Устройство контроля рабочей точки ЭОМ / В. М. Владимиров, А. А. Многогрешнов, А. А. Казаков, А. М. Сеченых // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 10. – С. 167-169.

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Инженерной Физики и Радиоэлектроники

Базовая кафедра Фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

А. Н. Втюрин

подпись

« 15 » 06 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование влияния шумов ВОЛС используемой в составе БИС ГЛОНАСС

16.04.01 Техническая физика

16.04.01.02 Оптическая физика и квантовая электроника

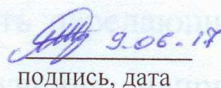
Научный руководитель


подпись, дата

доцент, к.ф.-м.н.
должность, ученая степень

М.Ю. Реушев
инициалы, фамилия

Выпускник


подпись, дата

А.А. Тодоякова
инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата

А.В. Шамшури
инициалы, фамилия

Красноярск 2017